

Спільним для обидвох сімейств автобусів А107- А507 є перехід на відпрацьовані на ТУР А303/407 нові, так зв. клеєві кузовні технології з облицюванням боковин, дверей, внутрішніх панелей салону композитними матеріалами-плитою (взамін точкового приварювання сталевих листів), склопластикові формотворні, що докорінно покращило корозійну стійкість кузова, а також максимальна агрегатно-вузлова уніфікація на базі кращих європейських виробників, що забезпечує надійний ресурс до капітального ремонту автобусів понад 15 років – півтора мільйона кілометрів пробігу у непростих в порівнянні з ЄС умовах експлуатації в Україні.

УДК 629.113

## ДИНАМІЧНА СТІЙКІСТЬ АВТОБУСА ОСОБЛИВО ВЕЛИКОГО КЛАСУ

### DYNAMIC STABILITY OF BUS OF ESPECIALLY LARGE CLASS

Володимир Сахно<sup>1</sup>, Ігор Мурований<sup>2</sup>, Вадим Селезньов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Національний транспортний університет  
вул. Омеляновича-Павленка, 1, Київ, 02000

<sup>2</sup>Луцький національний технічний університет  
вул. Львівська, 75, Луцьк, 43018

*The mathematical model of a articulated bus was developed, with the help of which it was established that the movement of a typical articulated vehicle to a speed of 31 m / s in the absence of control effects on the trailer wheels is stable. The use of control effects to correct the trajectory of the trailer leads to the fact that already at a speed of 12 m / s, among the roots of the system of equations, a positive root appears, indicating a possible oscillatory instability of the articulated vehicle.*

Безпечний рух автомобіля і автопоїзда багато в чому визначається його динамічними властивостями і, у значній мірі, маневреністю, стійкістю і керованістю. Для будь-якого транспортного засобу, у тому числі і для автобуса, основними параметрами призначення (показниками його здатності виконувати свої функції), є габаритні розміри, масові параметри, швидкісні та динамічні характеристики виконуваної транспортної роботи та ін. У залежності від умов експлуатації (транспортних і дорожніх) на перший план виходять різні параметри. Для всіх міських автобусів це пасажиромісткість, темп пасажирообміну, динаміка розганяння, стійкість, керованість, а для міських особливо великих, крім того, маневреність. У більшості країн світу габаритна довжина одиночних автобусів обмежується на рівні 12 м, хоч і зустрічаються конструкції довжиною до 15 м, а зчленованих – 18 м. Для автобусів особливо великого класу однією з найбільш значних властивостей є маневреність. Відповідно до ДСТУ UN/ECE R 36-03 пасажирські транспортні засоби великої місткості повинні вписатися у поворот із зовнішнім радіусом 12,50 м та внутрішнім 5,30м. Такі ж значення показників маневреності передбачені Угодою про маси і габарити транспортних засобів, які здійснюють міждержавні перевезення по автомобільних дорогах держав-учасниць СНД.

Автобуси особливо великого класу з метою забезпечення необхідної маневреності можуть бути виконані шарнірно-зчленованими (ШЗА), що складаються саме з автобуса і причіпної секції (причепа). Досягнення нормованих показників маневреності автобусів особливо великого класу загальною довжиною до 18 м можливе при тільки керованих передніх колесах тягової секції. При збільшенні загальної довжини ШЗА понад 18 м

необхідне керування колесами причіпної секції. Проте автобуси з керованою задньою віссю схильні до поперечних відхилень причепа, що необхідно враховувати при виборі і обґрунтуванні компоновальних і масових параметрів ШЗА. Відомо, що в керованих автопоїздах, зокрема в ШЗА, поворот коліс причепа залежить від кута складання автопоїзда і швидкості руху: при маневруванні з малою швидкістю, коли відведенням коліс автобуса і причепа можна знехтувати, колеса причепа повертаються в бік, протилежний повороту коліс автобуса, причому кут їхнього повороту тим більший, чим менша швидкість руху і менший радіус повороту. З підвищенням швидкості руху - кут повороту керованих коліс причепа зменшується, радіус траєкторії збільшується і при досягненні певної швидкості взагалі стає рівним нулю. Проте сказати заздалегідь, як поворот коліс причепа вплине на керованість і стійкість ШЗА при русі з великою швидкістю, коли кути відведення осей мають істотне значення, не виконавши відповідних досліджень, неможливо.

Проведеними до теперішнього часу дослідженнями встановлено, що експлуатація ШЗА в граничних режимах руху (недостатня ширина смуги руху, мінімальні радіуси повороту) вимагатиме конструктивних змін причіпної секції. Ефективність використання ШЗА в таких умовах в значній мірі залежить від їх здатності вписуватися в допустиму смугу руху і не створювати перешкод для транспортного потоку. Розв'язання цієї проблеми можливе при обладнанні причепів самоустановлювальними або керованими колесами. Вибір типу приводу управління для причепа є основною задачею маневреності і стійкості руху ШЗА.

Недостатня вивченість особливостей динамічної поведінки ШЗА з керованою причіпною секцією утрудняє їх конструювання, стримує досягнення оптимальних техніко-експлуатаційних показників.

У загальному випадку криволінійного руху ШЗА, коли має місце взаємне кутове переміщення автобуса і причепа, їх миттєві центри обертання не співпадають. Аналіз сумісної кінематики автобуса і причепа будується так, що точка зчеплення належить одночасно і автобусу, і причепу. При цьому кут складання ланок ШЗА, покладений в основу розрахунків координат траєкторії автобуса і причепа, а також закон управління поворотом коліс причепа залежать від кутів відведення коліс осей автопоїзда.

Іноді закон управління, придатний з погляду однієї якості управління, стає малоприматним або взагалі неприйнятним з погляду іншої якості управління. Тим більше це справедливо для зчленованих колісних машин. Тому при практичній реалізації ШЗА з керованим причепом повинен бути вибраний компромісний закон на основі всебічного аналізу різних критеріїв управління і їх впливу на динамічну поведінку автопоїзда як в стаціонарних, так і в несталих режимах руху.

Досягнення нормованих показників маневреності ШЗА можливе як за рахунок відповідних компоновальних схем, так і застосуванням керованих коліс причепа, привід яких може здійснюватися від електродвигуна, розташованого у причіпній секції. Крім того, цей електродвигун може бути тяговим для автобуса при русі у міських «пробках», коли швидкість руху не перевищує 5 м/с, а привід такого ШЗА можна вважати гібридним.

Однією із функцій гібридного приводу ШЗА є можливість його руху під дією тягових сил від електродвигуна на осі причепа. Модель ШЗА при реалізації тягового зусилля на осі причепа здобуває цілий ряд динамічних властивостей, характерних для системи «перевернених» маятників. У першу чергу відзначимо несприятливу тенденцію до складання ШЗА (випадок статичної втрати стійкості).

Для вирішення задачі про стійкість ШЗА з керованою віссю причепа необхідно скласти рівняння збуреного руху. У некритичних за Ляпуновим випадках можна обмежитися аналізом лінійного наближення стаціонарного руху автопоїзда, для якого система рівнянь, що описує плоскопаралельний рух ШЗА допускає розв'язок  $U=0$ ,  $\omega=0$ ,  $\varphi_1=0$ , ( $\theta=0$ ), де  $U, \omega$  – бічна і кутова швидкість центру мас автобуса,  $\theta, \varphi_1$  – кут повороту

керованих коліс автобуса і кут складання ШЗА і якому на площині дороги відповідає рух усіх точок автопоїзда зі швидкістю  $V$  вздовж прямої  $\theta = const$ .

Прийmemo такий рух за незбурений. Характеристичне рівняння, що описує цей рух, є рівнянням четвертого порядку з дуже громіздкими коефіцієнтами. Прямий аналіз цього рівняння, а також можливість отримання критеріїв стійкості у загальному вигляді являє собою досить складну задачу, розв'язок якої у загальному випадку неможливий. Тому єдиним методом дослідження стійкості такого автопоїзда є чисельне визначення коренів характеристичного рівняння, наприклад, за допомогою програмного забезпечення Maple 12. Проведеними розрахунками встановлено, що для типового тривісного автобуса особливо великого класу критична швидкість руху ШЗА тільки з переднім керуючим колісним модулем склала біля 30 м/с (108 км/год), з переднім і заднім керуючим модулем 26,5 м/с (95,4 км/год) і з переднім керуючим модулем і задньою самовстановлювальною віссю 14,8 м/с (53,28 км/год), що менше максимально допустимої (навіть при експлуатації автобуса в місті), то для таких автобусів необхідно передбачати блокування коліс самовстановлювальної осі на швидкостях в межах 45...55 км/год.

Визначення конфігурації ШЗА й інших параметрів стаціонарного режиму після втрати стійкості прямолінійного руху, а також умов його стійкості складає другий етап дослідження нелінійної динамічної системи. При реалізації тягового зусилля на осі причіпної секції ШЗА у рівняння плоскопаралельного руху вводяться такі параметри системи (активні керовані параметри):  $\alpha$ , що характеризує тягове зусилля, і  $\theta_0$  – кут повороту керованих коліс автобуса, які визначають весь набір стаціонарних станів системи:  $v$  - швидкість подовжнього руху,  $u_1$ ,  $\omega$  - поперечну і кутову швидкість центра мас тягача,  $\phi$  - кут складання,  $\omega_1$  - кутову швидкість причіпної ланки.

Прямолінійному руху ШЗА відповідає нульове значення параметра  $\theta_0$ , при  $\theta_0 \rightarrow 0$  до тривіального рішення прагнуть кругові стаціонарні режими досить великого радіуса. Це дає можливість застосувати графо-аналітичний метод продовження за параметром, рухаючись по гілці рівноважних станів.

Критична швидкість усталених кругових рухів істотно залежить від значень параметра  $\theta$ . Втрата стійкості відбувається з появою кратного рівноважного стану (в результаті біфуркації чи злиття народження кратних стаціонарних режимів). Відповідно до результатів прикладної теорії катастроф критична безліч у деякій малій околиці прямолінійного руху повинна реалізовуватися у виді напівкубічної параболі.

Аналіз громіздких умов статичної стійкості ШЗА при реалізації сили тяги на осі причепа показав, що значення коефіцієнтів опору руху на першій і другій осях автобуса незначно впливає на величину критичної швидкості і критичне значення параметра  $\alpha$ , що визначає величину тягового зусилля. Разом з цим встановлено на суттєву залежність критичної швидкості руху ШЗА від величини коефіцієнта, що показує, яка доля вертикального навантаження на вісь причепа реалізується у вигляді тягового зусилля.

Для ШЗА із задньою керованою віссю підвищити критичну швидкість руху можна належним вибором плеча стабілізації  $\lambda$ . Зважаючи на те, що для реальних конструкцій ШЗА співвідношення коефіцієнтів опору відведенню коліс керованої осі причепа і керуючого модуля автобуса знаходиться в межах 1,2...1,3, величина плеча стабілізації складає 0,015...0,020 м.

Висновки. Розроблена математична модель ШЗА, за допомогою якої встановлено, що рух типового автопоїзда до швидкості 31 м/с за відсутності керуючих впливів на колесах причепа є стійким. Використання керуючих впливів для корекції траєкторії причепа призводить до того, що вже при швидкості 12 м/с серед коренів системи рівнянь з'являється додатний корінь, що вказує на коливальну нестійкість ШЗА.